8 Ermittlung und Bewertung von Einsatzpotenzialen der Mensch-Roboter-Kollaboration

Methodisches Vorgehensmodell für die industrielle Montage

Christoph Petzoldt,
Dennis Keiser,
Henrik Siesenis,
Thies Beinke und
Michael Freitag, Bremen

Aufgrund des starken Kostendrucks sowie der immer weiter steigenden Variantenvielfalt stellt die Kollaboration von Mensch und Roboter einen möglichen Lösungsvektor für weitere Flexibilisierungs- und Rationalisierungspotenziale in der Montage dar. Die gezielte Ermittlung und Bewertung von Einsatzpotenzialen bildet in der Praxis die Grundlage für den erfolgreichen Einsatz von kollaborativen Robotern. In diesem Beitrag wird ein Vorgehensmodell für die methodische Analyse des Einsatzes von kollaborativen Robotern in Montageszenarien vorgeschlagen und evaluiert.*)

1 Einführung

Die Montage ist einem immer stärkerem Kostendruck [1] bei gleichbleibenden Qualitätsanforderungen [2] und zunehmender Variantenvielfalt [3] ausgesetzt. Die starke Kundenorientierung und die damit verbundene Individualisierung stellt hohe Flexibilitätsanforderungen an Montagesysteme [4, 5] und macht eine wirtschaftliche Automatisierung von Montageprozessen oft nur schwer möglich [6]. Zudem stellt der demografische Wandel in der betrieblichen Praxis eine immer größere Herausforderung dar [7]. Kollaborative Roboter, sog. „Cobots“, gelten als vielversprechender technologischer Ansatz, um diesen Herausforderungen zu begegnen [8]. Kollaborative Prozessszenarien nutzen die kognitiven und motorischen Vorteile des Menschen und integrieren gleichzeitig die Stärken eines Roboters [9]. Diese bestehen insbesondere in der hohen Wiederholgenauigkeit so-

wie der großen Prozesssicherheit [10]. Trotz der großen Potenziale kollaborativer Szenarien, niedrigerer Investitionskosten im Vergleich zu klassischen Industrierobotern und dem nachgewiesenen Bedarf an neuen technologischen Lösungen in der Montage, stellen Cobots weiterhin eine Nische dar. Mit einem geringen Anteil im Gesamtmarkt der Industrieroboter können kollaborative Anwendungen allenfalls als Leuchtturm- oder Demonstrationsprojekte bezeichnet werden.

Der vorliegende Beitrag stellt eine Methode zur Ermittlung und Bewertung von Einsatzpotenzialen von kollaborativen Robotern in der Montage vor, die eine ganzheitliche Vorabbewertung ermöglicht. Der Beitrag orientiert sich dabei an dem von Peffers [11] vorgeschlagenen Phasenmodell des Design Science Research (DSR) und ist wie folgt gegliedert: Im zweiten Abschnitt werden die Grundlagen der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) dargestellt. Im dritten Abschnitt

Bild 1. Aufbau und Inhalt des Beitrags in Anlehnung an das Design Science Research (DSR)-Vorgehensmodell

DSR	Betrachtungsgegenstand	Abschnitt
Problem-identifikation & Motivation	• Detailliertes Problemverständnis in der industriellen Montage hinsichtlich der Anwendung von kollaborativer Robotik	1
Lösungs-orientierte Zielsuche	• Stand der Technik zu den Levels der Automatisierung und zur Mensch-Roboter-Kollaboration • Stand der Technik zu Methoden zur Potentialanalyse	2 & 3
Design & Entwicklung	• Entwicklung einer Methode zur Potentialanalyse von kollaborativen Robotern in der Montage	4
Demonstration	• Anwendung der Methode in industriellem Fallbeispiel	5
Evaluation	• Diskussion der Ergebnisse und Ableitung des weiteren Forschungsbedarfs	5 & 6
Kommunikation		

*) Hinweis

Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen von den Mitgliedern des ZWF-Advisory Board wissenschaftlich begutachteten Fachaufsatz (Peer-Review).

wird der Stand der Technik von Methoden zur Potenzialanalyse präsentiert und mittels aufgestellter Anforderungen verglichen. Der vierte Abschnitt beschreibt die Entwicklung der Methode und in Kapitel fünf erfolgt die Anwendung und Evaluation der Methode anhand dreier praxisrelevanter Fallbeispiele. Das letzte Kapitel diskutiert abschließend weitergehende Herausforderungen und Potenziale. Bild 1 zeigt die Schritte des DSR, die hier adressierten Betrachtungsgegenstände sowie dessen Verortung im Rahmen dieses Beitrags.

Grundlagen zur Mensch-Roboter-Kollaboration in der Montage

In der Großserienmontage konnten in den letzten Jahrzehnten viele Prozesse automatisiert und damit wirtschaftlicher gestaltet werden [1]. Bei kleineren bis mittleren Stückzahlen ist die Montage weiterhin durch die manuelle Verrichtung geprägt [12]. Insbesondere für kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) ist die Vollautomatisierung oftmals wirtschaftlich nicht vertretbar [13]. Dem Ziel folgend, auch in einem Umfeld mit hoher Variantenvielfalt und geringer Losgrößen eine Automatisierung mit vertretbarer Amortisationszeit zu ermöglichen, konzentriert sich die Entwicklung im Bereich der Industrieroboter zunehmend auf die Leichtbaurobotik [13]. Durch hybride Szenarien sollen die Vorteile des Menschen mit den der Roboter zusammengeführt werden. Der Mensch zeichnet sich dabei durch seine hohe kognitive und motorische Flexibilität und Anpassbarkeit aus [14]. Zudem ist er lernfähig und kann somit schnell auf Prozessänderungen und mögliche Störungen reagieren [2]. Die fehlende Positioniergenauigkeit führt in der industriellen Praxis jedoch oftmals zur Notwendigkeit von unterstützenden Vorrichtungen. Ebenso steigt die Fehleranfälligkeit durch den Faktor Mensch bei monotonen Tätigkeiten [15]. Demgegenüber stehen die in Bild 2 dargestellten Stärken von Robotern. Diese liegen insbesondere in der hohen Positionier- und Wiederholgenauigkeit sowie der prinzipiellen Fähigkeit hohe Nutzlasten aufheben zu können [14].

Bild 2. Gegenüberstellung der Stärken und Schwächen von Menschen und Robotern [2, 9, 42]

	Mensch	Roboter
Stärken	- Reaktions- und Interpretationsvermögen - Improvisationsvermögen - Lernfähigkeit - Rückgriff auf Erfahrungen - Hohe Flexibilität und Anpassbarkeit - Sensorische Fähigkeiten	- Hohe Positionier- / Wiederholgenauigkeit - Hohe Bewegungsgeschwindigkeit - Hohe Kraft und Ausdauer - Große Reichweiten - Hohe Rechenleistung und Zuverlässigkeit - Hohe Verfügbarkeit - Fähigkeit zum Multitasking
Schwächen	- Ermüdungsverhalten - Begrenzte Kraft und Ausdauer - Keine Fähigkeit zum Multitasking - Begrenzte Verfügbarkeit - Beeinflussbar durch Kurzzeitgedächtnis	- Kein Rückgriff auf Erfahrungen - Kein Reaktions- / Interpretationsvermögen - Kein Improvisationsvermögen - Vergleichsweise unflexibel

Hybride Montagesystemen subsumieren die genannten Vorteile von Mensch und Roboter und ermöglichen damit den wirtschaftlichen Betrieb von Cobots bereits bei geringen bis mittleren Stückzahlen [8, 9, 16].

Trotz der großen Forschungsaktivitäten findet sich in der wissenschaftlichen Fachliteratur bisher keine einheitliche Taxonomie für die Klassifizierung der MRK (vgl. [9, 17–19]). Die in Bild 3 gezeigte Klassifizierung greift die industrielle Praxis auf und ermöglicht damit eine Unterscheidung anhand definierter Merkmale. Als klassisches und sehr weit verbreitetes Szenario kann der Schutzzaunbetrieb definiert werden [20]. Dies stellt, aufgrund der trennenden Schutteinrichtung kein echtes Kooperationszenario dar. Davon unterschieden wird die Koexistenz von Mensch und Roboter. Eine Kapselung ist aufgrund des sicherheitsüberwachten

Halts nicht notwendig; die Arbeitsräume sind jedoch weiterhin strikt getrennt und der Kontakt von Mensch und Roboter ist im produktiven Zustand nicht möglich [21]. Als nächste Stufe kann die synchronisierte Bearbeitung von Bauteilen definiert werden. Dieses Szenario ermöglicht zwar einen gemeinsamen Arbeitsraum, die gleichzeitige Verrichtung innerhalb des definierten Arbeitsraums wird jedoch nicht vorgesehen. In kooperativen Szenarien ist es möglich gleichzeitig in einem definierten Arbeitsraum zu agieren, jedoch nicht am selben Bauteil. Die Bearbeitung erfolgt somit weiterhin sequenziell. Eine gleichzeitige und gemeinsame Bearbeitung erfolgt in Szenario fünf, der Kollaboration.

Studien belegen, dass sich in der Industrie bisher kaum kollaborative Szenarien finden (vgl. [12]). Dies bedingt sich insbesondere durch die langen Prozesszeiten, da die Bahngeschwindigkeit des

Arbeitsschritte	Sequentiell				gleichzeitig
Arbeitsraum	Getrennte Arbeitsräume		Gemeinsamer Kollaborationsraum – zeitliche Trennung	Gemeinsamer Kollaborationsraum	
Arbeitsaufgabe	Keine Kopplung der Aufgabe		Gekoppelte Aufgaben		Gemeinsame Aufgabe
Physischer Kontakt	Nicht möglich		Möglich, nicht notwendig		Möglich, häufig erwünscht
Mindestanforderungen gemäß DIN EN ISO 10218-1	Automatikbetrieb mit trennender Schutteinrichtung	Sicherheitsüberwachter Halt	Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung		
			Leistungs- und Kraftbegrenzung		
			Bahngeschwindigkeit		Handführung
Geschwindigkeit	Maximale Geschwindigkeit	Begrenzte Geschwindigkeit			

Bild 3. Übersicht der Interaktionsformen und -arten von Robotersystemen und deren Merkmale [13], erweitert nach [43]

	Anforderungen					
	Spezifisches Anwendung in der Montage	Methodenunterstützung	Prozessbezogen	Qualität	Wirtschaftlichkeit	Ergonomie
Leidl (2016)	●	◐	○	○	●	○
Malik (2019)	●	○	◐	○	◐	○
Linsinger et al. (2019)	●	◐	●	○	◐	◐
Rally und Scholz (2020)	◐	◐	◐	◐	●	◐
Pfeiffer und Weber (2020)	◐	◐	◐	○	●	●

Bild 4. Vergleich von Methoden zur Potenzialanalyse der Mensch-Roboter-Kollaboration in der Montage

Bild 4 subsumiert die aufgestellten Anforderungen und nimmt anhand von bestehenden Methoden eine Bewertung vor. Von den fünf analysierten Methoden [7, 23–26] zeigen alle eine starke Fokussierung auf die wirtschaftliche Bewertung. Die Qualität wird von keiner der Methoden ausreichend adressiert. Ergonomische Aspekte werden insbesondere in der von Pfeiffer und Weber [26] vorgestellten Methode berücksichtigt. Zudem kann eine fehlende Methodenunterstützung für den Anwender assistiert werden.

Methode zur Ermittlung und Bewertung von Einsatzpotenzialen der MRK

Auf Basis der Anforderungen sowie der in Bild 4 dargestellten Gegenüberstellung folgt der Bedarf nach einer ganzheitlichen Vorgehensweise zur methodengestützten Bewertung der MRK-Einsatzpotenziale in der Montage hinsichtlich der Aspekte Qualität, Wirtschaftlichkeit und Ergonomie. Hierfür wird das in Bild 5 dargestellte und nachfolgend erläuterte Vorgehensmodell vorgeschlagen, welches sich in folgende fünf Phasen gliedert und die Anforderungen A1 bis A6 erfüllt:

Roboters stark limitiert ist. Demgegenüber stehen Vorteile wie die flexiblere Prozessplanung, die dynamische Zuweisung von Prozessschritten und die damit verbundene Reduzierung möglicher Wartezeiten [22].

Bestehende Methoden zur Bewertung der Mensch-Roboter-Kollaboration

Ausgehend von den beschriebenen Grundlagen der MRK werden nachfolgend Anforderungen an das zu entwickelnde Vorgehensmodell abgeleitet und bestehende Methoden zur Potenzialanalyse der MRK aus Wissenschaft und Praxis anhand der definierten Kriterien bewertet. Übergeordnet kann als erste Anforderung die spezifische Ausrichtung des Vorgehens auf die industrielle Montage (A1) formuliert werden. Um einen möglichst effizienten Einsatz des Vorgehens zu gewährleisten, ist eine methodenunterstützte Analyse (A2) und Bewertung zielführend. Dies ermöglicht außerdem eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse und ferner ist eine gute Umsetzbarkeit in der Praxis gewährleistet. Zudem ist eine starke Prozessorientierung (A3) der Methode wünschenswert, da insbesondere in der Montage starke prozessbezogene Abhängigkeiten bestehen. Aus den übergeordneten Zielen der Montage können die notwendigen Analysedimensionen abgeleitet werden. Den hohen Qualitätsansprüchen in der Montage folgend kann die Berücksichtigung

der Qualität (A4) als Bewertungsdimension definiert werden. Ausgehend von der Dimension Zeit ist zudem die Wirtschaftlichkeit während der Analyse zu bewerten (A5). Potenziale von Cobots bestehen außerdem in einer ergonomischen Unterstützung und damit einer stärkeren Mitarbeiterorientierung. Daher kann als weitere Anforderung die Analyse hinsichtlich der Ergonomie (A6) definiert werden.

Bild 5. Vorgehensmodell zur Ermittlung und Bewertung von MRK-Einsatzpotenzialen in der industriellen Montage

- initiale Partizipation,
- Ist-Analyse,
- Entwicklung Einsatzpotenziale,
- Bewertung und Auswahl Einsatzpotenziale sowie
- Feinplanung und Implementierung.

Initiale Partizipation

Im ersten Schritt erfolgt eine initiale Partizipation, welche sich in zwei Aspekte unterteilt: Zum einen wird das operative Personal direkt über das Vorhaben informiert und ein initiales Brainstorming mit den Montagearbeitern zu möglichen Einsatzbereichen durchgeführt. Hierdurch kann sowohl eine Steigerung der Akzeptanz als auch ein erweiterter Blick zu möglichen Einsatzpotenzialen erreicht werden. Zum anderen wird eine Beobachtung des Montageprozesses vorgenommen, um bereits vor Einstieg in die Ist-Analyse einen ersten Eindruck zu prozessualen, bzw. ergonomischen Verbesserungspotenzialen zu erhalten.

Ist-Analyse

Im Anschluss an die erste Phase wird im zweiten Schritt der Ist-Zustand der Montage analysiert, welche die Grundlage für die Lokalisierung von potentiellen MRK-Einsatzbereichen bildet. Hierzu werden zunächst prozessrelevante Daten (Montageorganisationsformen, verwendete Bauteile, Art der Montagevorgänge, Prozesszeiten) aufgenommen und darauf aufbauend der Montageprozess modelliert. Hierfür können Montagevorranggraphen genutzt oder vereinfacht eine BPMN-Modellierung verwendet werden (vgl. z.B. [27, 28]). So unternehmensseitig vorhanden, sollte eine Analyse von 8D-Reporten durch Studie von Anzahl und Beschreibung der Reporte zur faktenbasierten Erfassung von Problemereichen und Fehlerquellen durchgeführt werden. Obwohl hiermit primär ein Rückblick auf bereits entstandene Fehler erfolgt, für die ggf. schon Maßnahmen zur Fehlerverhütung implementiert wurden, können hierdurch typische Fehlertypen aufgedeckt werden. Zur Berücksichtigung möglicher zukünftiger Fehler kann optional eine Fehlermöglichkeits- und einflussanalyse (FMEA) [29] durchgeführt werden, mit welcher teilprozessweise Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeiten von Fehlern untersucht

und durch die Risikoprioritätszahl beurteilt werden. Aufgrund des hohen Aufwands für eine erste Lokalisierung von Fehlerquellen [29] ist diese allerdings ergänzend zu betrachten und wird in diesem Artikel nicht durchgeführt. Stattdessen werden mittels leitfadengestützter Experteninterviews direkte Informationen zu prozessualen Schwachstellen von operativen Mitarbeitern eingeholt. Insbesondere diejenigen Fehlertypen, die unmittelbar nach Auftreten vom Mitarbeiter behoben werden, tauchen typischerweise nicht in Fehlerreports auf, sind aber für die Umsetzung von MRK-Anwendungen von hoher Bedeutung. Die aus den genannten Methoden ermittelten Fehler werden überlagert und teilprozessbezogen in die Montageprozessmodellierung eingetragen. Weiterhin können anhand der Interviews mit operativen Mitarbeitern persönlich empfundene, ergonomisch ungünstige Tätigkeiten aus mitarbeiterzentrierter Sicht identifiziert werden.

Entwicklung MRK-Einsatzpotenziale

Nach erfolgreicher Ist-Analyse und Identifikation potentieller Fehlertypen sowie ergonomischer Problembereiche findet im dritten Schritt die Entwicklung der MRK-Einsatzpotenziale statt. Diese erfolgt im ersten Schritt methodengestützt durch Anwendung von Kreativitätstechniken (vgl. z.B. [30]). Das Ziel ist, zunächst ohne Berücksichtigung des Prozesses, allgemeine Konstellationen für Cobot-Einsatzmöglichkeiten zu identifizieren. Ergänzend dazu können die während der initialen Partizipation (Phase 1) ermittelten Einsatzbereiche und Verbesserungspotenziale herangezogen werden. Anschließend erfolgt im zweiten Schritt eine Analyse des Automatisierungsaufwands, welche sequentiell für alle Teilprozesse durchgeführt wird. Diese stellt eine Grundlage für die in Phase 4 folgende Bewertung und Auswahl der MRK-Einsatzpotenziale dar, da aus wirtschaftlicher Perspektive neben der Notwendigkeit einer Verbesserung auch der Aufwand zur Umsetzung einer MRK-Lösung von zentraler Bedeutung ist. Hierfür kommt die von Ross vorgeschlagene, fallspezifische Methode zur Bewertung des Automatisierungsaufwands von Montageoperationen zum Einsatz, wel-

che Bauteilkriterien und Montageprozessmerkmale berücksichtigt [31]. Das Ergebnis dieser Analyse, eine Aufwandsabschätzung zur Automatisierung einzelner bauteilbezogener Montageoperationen, wird mit den Ergebnissen der Ist-Analyse überlagert, sodass sich eine Gegenüberstellung von Verbesserungspotenzialen und Automatisierungsaufwänden ergibt. Im dritten Schritt erfolgt hierauf aufbauend nochmals eine Erarbeitung von Cobot-Einsatzmöglichkeiten unter Einsatz von Kreativitätstechniken, wobei nun montageprozessbezogen vorgegangen wird. Hierbei sind insbesondere auch Kombinationsmöglichkeiten von Lösungen, bzw. die Anwendung in mehreren Prozessen zu prüfen.

Bewertung und Auswahl MRK-Einsatzpotenziale

Anhand der verschiedenen Aspekte der überlagerten Analyseergebnisse erfolgt optional zunächst eine Vorauswahl der entwickelten MRK-Einsatzpotenziale, welche in dieser Phase detailliert bewertet werden. Für die Bewertung dieser werden entsprechend der Anforderungen A4 bis A6 die drei Zieldimensionen Wirtschaftlichkeit, Qualitätssicherung und Ergonomie, jeweils unter Einsatz geeigneter Methoden, berücksichtigt. Durch Gewichtung der Zieldimensionen erfolgt schließlich die Auswahl der MRK-Lösung.

Da die Prozesszeit in Bezug auf die Lohnkosten direkt mit den Produktkosten zusammenhängt, erfolgt die Bewertung der Wirtschaftlichkeit klassisch durch Vergleich der Prozesszeiten [1] vor (Ist-Zeiten) und nach (Soll-Zeiten) Einsatz einer MRK-Lösung. Die Ist-Prozesszeiten werden aus den Analyseergebnissen aus Phase 2 entnommen; Soll-Prozesszeiten werden mittels des Methods-Time Measurement (MTM) Verfahrens [32] für alle Teilprozessschritte bestimmt. Durch Fokussierung auf die wesentlichen Montageteilfunktionen (Fügen, Handhaben, Kontrollieren, Justieren, Sonderoperationen) [1], [33] wird in diesem Artikel der Aufwand für die Durchführung reduziert [32]. Die sich hieraus ergebenden, personalkostenbezogenen jährlichen Einsparpotenziale werden den zu tätigenen Investitionskosten gegenübergestellt. Hierfür können statische und dynamische Investi-

tionsrechnungsverfahren angewandt werden [34]. Im Rahmen dieses Beitrags (und in erster Prozessiteration) wird dabei aufgrund der einfacheren und schnelleren Anwendbarkeit [35] auf die statische Amortisationsrechnung zurückgegriffen. Hierbei wird die Amortisationszeit durch Gegenüberstellung von Investitionskosten und jährlichen Zahlungseingängen (eingesparte variable Personalkosten) berechnet.

Eine (monetäre) Bewertung des Kriteriums der Qualitätssicherung wird im vorgeschlagenen Vorgehensmodell mittels einer Analyse der einzusparenden Fehlerkosten durch den Einsatz eines kollaborativen Roboters durchgeführt. Diese Einsparpotenziale fließen ergänzend in die oben erläuterte Amortisationsrechnung als jährlicher Zahlungseingang ein. Nicht berücksichtigt werden dabei mögliche qualitätsbezogene Einflüsse auf Absatzzahlen durch Effekte der Kundenbindung und -gewinnung. Die Berechnung der fehlerkostenbezogenen Einsparungen erfolgt methodengestützt durch eine angepasste, monetär bewertete FMEA. Dazu werden im ersten Schritt der Ist-Status bewertet, wobei die Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeit prozentual angegeben und die Fehlerfolge mit jeweils entstehenden Fehlerkosten angegeben werden. Die voraussichtlich entstehenden jährlichen Fehlerkosten ergeben sich durch Multiplikation beider Wahrscheinlichkeiten mit den Fehlerfolgekosten und dem Jahresbedarf des Produktes. Im zweiten Schritt wird der Soll-Status bei Umsetzung einer MRK-Maßnahme analysiert. Hierfür wird die oben beschriebene monetär bewertete FMEA erneut, unter Annahme des Einsatzes einer MRK-Lösung, durchgeführt und für alle zu bewertenden MRK-Einsatzpotenziale wiederholt. Das sich daraus ergebende jeweilige Delta entspricht den Einsparpotenzialen durch den Einsatz der entsprechenden MRK-Lösung und kann entsprechend in der Amortisationsrechnung der jeweiligen MRK-Lösung als jährlicher Zahlungseingang addiert werden. Eine Gewichtung der Bewertungsdimensionen Qualitätssicherung und Wirtschaftlichkeit ist durch Gewichtung der jährlichen Zahlungseingänge in der Amortisationsrechnung möglich.

Die ergonomischen Potenziale eines MRK-Einsatzes werden im Rahmen des vorgestellten Vorgehensmodells nicht durch monetäre Kriterien bewertet, welche sich lediglich durch schwer bestimmbar Faktoren, wie reduzierte Krankheitsstage oder ergonomisch begünstigte Produktivitätssteigerungen (vgl. [36]), abbilden ließen. Stattdessen wird eine Verwendung der etablierten Methoden zur Bewertung der Ergonomie in der Montage, wie z. B. das Ergonomic Assessment Worksheet (EAWS), das OCRA-Verfahren oder die Leitmerkmalmethode (LMM), vorgeschlagen (vgl. [37]). Alle genannten Methoden bewerten die Tätigkeiten prinzipiell mittels Punktwerten in den Kategorien der zu bewegendes Gewichten, der Häufigkeit der Ausführung sowie der vorherrschenden Körperhaltung, woraus eine Gesamtpunktzahl ermittelt und mit einer kritischen Punktegrenze verglichen wird. Die Methoden unterscheiden sich dabei primär in Bezug auf den Detaillierungsgrad [38, 39]. Aufgrund der einfachen Anwendbarkeit und des geringeren zeitlichen Aufwands für die Durchführung der LMM wird für die erste Prozessiteration die Verwendung dieser Methode vorgeschlagen. Die ergonomischen Potenziale der jeweils zu bewertenden MRK-Lösung werden durch Vergleich der Risikowerte des bestehenden Prozesses mit denen des Soll-Prozesses bei Einsatz eines kollaborativen Roboters ermittelt.

Die Auswahl der MRK-Lösung erfolgt anschließend durch Überlagerung von kürzester Amortisationszeit mit ergonomischen Verbesserungspotenzial, wobei eine bedarfsgerechte Gewichtung beider Aspekte vorgenommen werden kann.

Feinplanung und Implementierung.

Nach Auswahl eines kollaborativen Einsatzszenarios erfolgt die Feinplanung und Implementierung, wobei klassische Projektmanagement-Methoden zu nutzen sind. Ergänzend kann hierzu die von Schröter entwickelte Methodik zur Planung von MRK-Arbeitssystemen [40] herangezogen werden. Ebenfalls sollten operative Mitarbeiter frühzeitig in den Detailplanungs- und Implementierungsprozess einbezogen und Schulungsmaßnahmen eingeleitet werden. Da in der Montage kontinuierliche Strukturangepas-

sungen notwendig sind (vgl. [41]), erfolgt nach der Implementierung die Iteration im Vorgehensmodell, beginnend mit Schritt 2.

■ Anwendung und Evaluation

Zur Evaluation der im vorherigen Abschnitt vorgestellten Methode wurde das Vorgehen zur Potenzialanalyse am Beispiel der Montage eines Abgasturboladers bei einem Maschinenbauunternehmen durchgeführt. Die Montage der Abgasturbolader, welche für mittel- und schnelllaufende Dieselmotoren im Schiffbau eingesetzt werden, erfolgt in einer Linienmontage. Die Montage ist dabei auf acht Arbeitsstationen verteilt und die Handhabung sowie die Stationsübergabe erfolgt mithilfe eines Werkstückträgers. Weiterhin ist die Montage durch eine hohe Variantenvielfalt bei mittleren Stückzahlen sowie durch vergleichsweise hohe Montagezeiten gekennzeichnet. Die Bauteilempfindlichkeit der einzelnen Bauteile kann als gering eingestuft werden.

Die Analyse der 8D Reports (Ist-Analyse) zeigt eine Häufung von Fehlern beim Fügeprozess von dichtungsrelevanten Bauteilen, zudem zeigt sich bei Schraubprozessen ein erhöhtes Fehlerpotenzial. Zur weiteren Analyse wurden sieben leitfadengestützte Experteninterviews mit operativen Mitarbeitern durchgeführt. Der Leitfaden ermöglicht eine gezielte Befragung und teilt das Gespräch zudem in die Bereiche Ergonomie und Qualität. Die manuelle Handhabung schwerer Bauteile wurde von allen Befragten als ergonomisch belastend genannt. Zudem wurde mehrfach auf die Monotonie der Arbeit hingewiesen. Im Bereich der Qualität zeigten sich bei der Auswertung der Ergebnisse zum einen Bedarfe zur besseren Handhabung der Bauteile, im Speziellen wurde die Winkelstellung der Gehäusebauteile als große Fehlerquelle genannt. Zum anderen wurde mehrfach das Fehlen von Schrauben als regelmäßig vorkommender Montagefehler hervorgehoben.

Im nächsten Schritt, der Entwicklung von Einsatzpotenzialen, wurde die Aufwandsanalyse nach Ross durchgeführt und deren Ergebnisse mit denen der Ist-Analyse überlagert. Geringe Aufwandswerte konnten beispielsweise für

Bild 6. Übersicht der entwickelten MRK-Einsatzpotenziale sowie Bewertung der Einsatzpotenziale hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Ergonomie und Qualitätssicherung am Beispiel der Abgasturbolader-Montage

Gewindebuchsen und Unterlegscheiben festgestellt werden, während feinfühliges Montagetätigkeiten, wie z.B. von O-Ringen und Kühlwasserleitungen, in einem erhöhten Automatisierungsaufwandwert resultierten. Ergänzend zu einem initialen Brainstorming wurden auf Basis der Ergebnisse mit Fokus auf kritischen und mit geringem Aufwandwert automatisierbaren Bereiche mögliche Einsatzpotenziale durch ein partizipatives Vorgehen entwickelt und entsprechend der vorgestellten Methodik entlang der drei Dimensionen bewertet (Bild 6). Für alle lokalisierten Einsatzszenarien wurde eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsberechnung

durchgeführt, wobei die jeweilige Amortisationszeit unter Berücksichtigung der ermittelten jährlichen Einsparpotenziale aufgrund von Zeiteinsparungen sowie reduzierter Fehlerkosten bestimmt wurde. Ergonomische Potenziale wurden davon unabhängig mittels der LMM jeweils mit und ohne Einsatz der entsprechenden MRK-Einsatzmöglichkeit bewertet.

Der analysierte Anwendungsfall der Abgasturbolader-Montage zeigt zum einen, insbesondere aufgrund schwerer Baugruppen, Potenziale von MRK hinsichtlich einer Verbesserung der ergonomischen Situation durch einen Einsatz in der Kommissionierung, zur montagege-

rechten Positionierung von Bauteilen (Handhabungs-Cobot) sowie als Kranersatz. Positiv hervorzuheben ist dabei im Besonderen der Wegfall von zuvor hohen LMM-Risikowerten durch den Einsatz der genannten MRK-Einsatzmöglichkeiten. Zum anderen wurde der MRK-Einsatz bei besonders monotonen Montageaufgaben als mögliches Einsatzfeld identifiziert, in dem sich insbesondere in den Aspekten Qualitätssicherung und Wirtschaftlichkeit Potenziale ergeben. Unter Berücksichtigung der Investitionskosten zeigen die Einsatzmöglichkeiten als Kommissionier-Cobot sowie als Montage-Cobot die geringsten Amortisationszeiten, wobei

diese nicht die Zielerreichung von Strukturprojekten des Unternehmens erreichen. Die Ergebnisse zur Fallstudie der Abgasturbolader-Montage sind in Bild 6 zusammenfassend qualitativ dargestellt.

Zusammenfassung

Dieser Beitrag stellt ein Vorgehensmodell zur Auswahl und Bewertung von MRK Anwendungen im Umfeld der industriellen Montage dar. Das ganzheitliche Vorgehen ist in fünf Schritte gegliedert und bietet dem Anwender einen anwendungsnahen Leitfaden und eine methodische Unterstützung bei der Auswahl von kollaborativen Szenarien. Durch die Überlagerung und Subsummierung von Analyseergebnissen wird zudem eine mehrdimensionale Potenzialbewertung ermöglicht. Die abschließende praktische Evaluation zeigt die Eignung der entwickelten Methode. Neben den möglichen Einsatzpotenzialen zeigen die Ergebnisse die grundlegenden Herausforderungen und Forschungsbedarfe von MRK Anwendungen: Oftmals sind wirtschaftlich sinnvolle Anwendungen bisher allenfalls kooperativ, während echte Kollaboration trotz aufgezeigter, insbesondere ergonomischer Potenziale im industriellen Umfeld nicht umgesetzt wird. Die üblichen Vorgehensweisen der Automatisierung sowie dessen Zielgrößen stehen der weiteren Verbreitung dabei im Weg.

Aktuelle Forschungsarbeiten fokussieren daher den Nachweis, dass die Montage ein sinnvolles Anwendungsfeld von MRK Anwendungen darstellt. Zudem soll die Methode erstens hinsichtlich spezifischer Kennwerte der Roboterhersteller erweitert werden, sodass die Hardwareauswahl für den Anwender erleichtert wird. Durch eine weitere Quantifizierung der ergonomischen Potenziale und Berücksichtigung dieser in der Amortisationsrechnung kann zweitens ein Mechanismus zur quantitativen Priorisierung aller Bewertungsdimensionen geschaffen werden.

Zuletzt stellt die, mit dem vorgeschlagenen Vorgehensmodell angestrebte, starke Einbindung von Mitarbeiter auf allen Ebenen in Unternehmen einen abschließenden Aspekt dar, um Akzeptanz und Durchdringungsgrad der MRK nachhaltig zu erhöhen.

Literatur

- Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. 1. Aufl. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2012
DOI: 10.1007/978-3-642-29061-9_1
- Müller, R.; Vette, M.; Mailahn, O.: Process-oriented Task Assignment for Assembly Processes with Human-robot Interaction. *Procedia CIRP* 44 (2016), S. 210–215
DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.080
- Stecken, J.; Linsinger, M.; Sudhoff, M.; Kühlenkötter, B.: Didactic Concept for Increasing Acceptance of Consistent Data Standards Using the Example of Assistance Systems in Assembly. *Procedia Manufacturing* 31 (2019), S. 277–282
DOI: 10.1016/j.promfg.2019.03.044
- Scholz-Reiter, B.; Freitag, M.: Autonomous Processes in Assembly Systems. *CIRP Annals* 56 (2007) 2, S. 712–729
DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.002
- Veigt, M.; Ganji, F.; Kluge, E. M.; Scholz-Reiter, B.: Autonomous Control in Production Planning and Control: How to Integrate Autonomous Control into Existing Production Planning and Control Structures. *Autonomous Cooperation and Control in Logistics*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2011, S. 313–329
DOI: 10.1007/978-3-642-19469-6_22
- Bänziger, T.: Intelligente Montageassistenten: Konzepte zur Planung und Programmierung der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter. ETH Zürich, 2019
- Rally P.; Scholtz, O.: Investitionsabschätzung für MRK-Anwendungen. In: Hees, F. et al. (Hrsg.): Kompetenz Montage – kollaborativ und wandlungsfähig – Projektatlas, no. January. Lehrstuhl für Informationsmanagement im Maschinenbau, Aachen 2020, S. 216–217
- Matthias, B.; Ding, H.: Die Zukunft der Mensch-Roboter Kollaboration in der industriellen Montage. Conference: Internationales Forum Mechatronics (ifm) 2013
- Oberer-Treitz, S.; Verl, A.: Einführung in die industrielle Robotik mit Mensch-Roboter-Kooperation. In: Müller, R.; Franke, J.; Henrich, D.; Kühlenkötter, B.; Raatz, A.; Verl, A. (Hrsg.): Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration. Carl Hanser Verlag, München, Wien 2019, S. 1–35
DOI: 10.3139/9783446453760.001
- Gualtieri, L.; Rauch, E.; Vidoni, R.: Emerging Research Fields in Safety and Ergonomics in Industrial Collaborative Robotics: A Systematic Literature Review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 67 (2021) February, 101998
DOI: 10.1016/j.rcim.2020.101998
- Peffer, K.; Tuunanen, T.; Rothenberger, M. A.; Chatterjee, S.: A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. *Journal of Management Information Systems* 24 (2007), S. 45–77
DOI: 10.2753/MIS0742-1222240302
- Fast-Berglund, Å.; Palmkvist, F.; Nyqvist, P.; Ekered, S.; Åkerman, M.: Evaluating Cobots for Final Assembly. *Procedia CIRP* 44 (2016), S. 175–180
DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.114
- Kopp, T.; Schäfer, A.; Kinkel, S.: Kollaborierende oder kollaborationsfähige Roboter? – Welche Rolle spielt die Mensch-Roboter-Kollaboration in der Praxis? *Ind. 4.0 Manag.* vol. 36, no. 2, pp. 19–23, 2020.
DOI: 10.30844/I40M_20-2_S19-23
- Tsarouchi, P.; Makris, S.; Chrysosouris, G.: Human-robot Interaction Review and Challenges on Task Planning and Programming. *Int. J. Comput. Integr. Manuf.* 29 (2016) 8, S. 916–931
- Di Pasquale, V.; Miranda, S.; Neumann, W. P.; Setayesh, A.: Human Reliability in Manual Assembly Systems: A Systematic Literature Review. *IFAC-PapersOnLine* 51 (2018) 11, S. 675–680
DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.396
- Krüger, J.; Lien, T. K.; Verl, A.: Cooperation of Human and Machines in Assembly Lines. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 58 (2009) 2, S. 628–646
DOI: 10.1016/j.cirp.2009.09.009
- Malik, A. A.; Bilberg, A.: Developing a Reference Model for Human-robot Interaction. *International Journal Interact. Des. Manuf.* 13 (2019) 4, S. 1541–1547
DOI: 10.1007/s12008-019-00591-6
- Yanco, H. A.; Drury, J.: Classifying Human-robot Interaction: An Updated Taxonomy. In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE Cat. No.04CH37583)*, vol. 3, 2004, S. 2841–2846
- Villani, V.; Pini, F.; Leali, F.; Secchi, C.: Survey on Human-robot Collaboration in Industrial Settings: Safety, Intuitive Interfaces and Applications. *Mechatronics* 55 (2018), S. 248–266
DOI: 10.1016/j.mechatronics.2018.02.009
- Müller, R.; Franke, J.; Henrich, D.; Kühlenkötter, B.; Raatz, A.; Verl, A.: Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration. Carl Hanser Verlag, München, Wien 2019
DOI: 10.3139/9783446453760.fm
- Bauer, W.; Bender, M.; Braun, M.; Rally, P.; Scholtz, O.: Lightweight Robots in Manual Assembly – Best to Start Simply! Examining Companies' Initial Experiences with Lightweight Robots. 2016
- Antonelli, D.; Astanin, S.; Bruno, G.: Applicability of Human-robot Collaboration to Small Batch Production. In: *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 2016, vol. 480, S. 24–32
DOI: 10.1007/978-3-319-45390-3_3
- Leidl, C.: Entwicklung einer Bewertungs-methode zur Auswahl kollaborierender Roboter für Cyber-Physikalische Montagesysteme. Institut für Managementwissenschaften, Wien 2016

24. Malik, A. A.: Human-robot Collaboration: Application Guidelines. 2019
25. Linsinger, M.; Sudhoff, M.; Lemmerz, K.; Glogowski, P.; Kuhlentötter, B.: Task-based Potenzial Analysis for Human-Robot Collaboration within Assembly Systems. In: Tagungsband des 3. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2018, S. 1–12
DOI: 10.1007/978-3-662-56714-2_1
26. Peifer, Y.; Weber, M.-A.: Vorgehensmodell zur Integration der Mensch-Roboter-Kollaboration. ZWF 115 (2020) 5, S. 279–282
DOI: 10.3139/104.112274
27. Petzoldt, C.; Keiser, D.; Beinke, T.; Freitag, M.: Requirements for an Incentive-Based Assistance System for Manual Assembly. In: Freitag, M.; Haasis, H.-D.; Kotzab, H.; Pannek, J. (Hrsg.): Dynamics in Logistics – Proceedings of the 7th International Conference on Dynamics in Logistics (LDIC 2020), Bremen, Germany. Springer International Publishing, Berlin 2020, S. 541–553
DOI: 10.1007/978-3-030-44783-0_50
28. Petzoldt, C.; Keiser, D.; Beinke, T.; Freitag, M.: Functionalities and Implementation of Future Informational Assistance Systems for Manual Assembly. In: Freitag, M.; Kinra, A.; Kotzab, H.; Kreowski, H.-J.; Thoben, K.-D. (Hrsg.): Subject-Oriented Business Process Management. The Digital Workplace – Nucleus of Transformation. Proceedings of the 12th International Conference, S-BPM ONE 2020, Bremen, Germany, December 2–3, 2020. Springer International Publishing, Berlin 2020, S. 88–109
DOI: 10.1007/978-3-030-64351-5_7
29. Werdich, M.: FMEA – Einführung und Moderation: Durch systematische Entwicklung zur übersichtlichen Risikominimierung (inkl. Methoden im Umfeld). 2. Aufl., Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden 2012
30. Nagel, K.: Kreativitätstechniken in Unternehmen. Oldenbourg Verlag, München 2009
DOI: 10.1524/9783486598612
31. Ross, P.: Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung (Bd. 170). Technische Universität München, München 2002
32. Bokranz, R. Landau, K.: Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen: MTM-Handbuch. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart 2006
33. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik (Hrsg.): VDI 2860 – Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. Beuth Verlag, Berlin 1990
34. Carstensen, P.: Investitionsrechnung kompakt. Gabler Verlag, Wiesbaden 2008
35. Jochem, R.: Was kostet Qualität? – Wirtschaftlichkeit von Qualität ermitteln. Carl Hanser Verlag, München 2018
DOI: 10.3139/9783446456921_fm
36. Daub, U.; Ackermann, A.; Kopp, V.: Kriterien zur Bewertung ergonomischer Maßnahmen der Kostem-Nutzen-Analyse. 2019
37. Heidl, M.J.; Boespflug, A.; Wakula, J.: Evaluierung von fünf Screening-Bewertungsverfahren für repetitive physische Belastungen anhand des subjektiven Belastungsempfindens der Arbeitspersonen in der Montage der Automobil-Zulieferindustrie. Zeitschrift Arbeitswiss. 72 (2018) 2, S. 120–129
DOI: 10.1007/s41449-018-0096-9
38. Staut, S.: Ergonomie-Analyse: Methoden und Verfahren. Haufe-Lexware, 2017
39. Eberle, P.: Entwicklung eines Modells zur effizienten Fabriklayoutplanung unter synchroner Berücksichtigung ergonomischer und produktivitätsorientierter Gestaltungsfaktoren: Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften, Wien 2016
40. Schröter, D.: Entwicklung einer Methodik zur Planung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart 2018
41. Westkämper, E.; Bullinger, H.-J.; Zahn, E. (Hrsg.): Montageplanung – effizient und marktgerecht. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2001
DOI: 10.1007/978-3-642-56438-3
42. Hoffman, R.R.; Feltoch, P.J.; Ford, K.M.; Woods, D.D.: A Rose by any Other Name...Would Probably Be Given an Acronym [Cognitive Systems Engineering]. IEEE Intell. Syst. 17 (2002) 4, S. 72–80
DOI: 10.1109/MIS.2002.1024755
43. Bauer, W.; Bender, M.; Braun, M.; Rally, P.; Scholtz, O.: Roboter ohne Schutzzaun in der Montage – Stand der Anwendungen in deutschen Montagen. wt Werkstattstechnik online 106 (2016) 9, S. 616–621

Die Autoren dieses Beitrags

Christoph Petzoldt, M.Sc., leitet die Abteilung Robotik und Automatisierung am BIBA – Bremer Institut für Produktion und Logistik und beschäftigt sich mit dynamischer Kollaboration und Mensch-Technik-Interaktion in Montagesystemen.

Dennis Keiser, M.Sc., arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter am BIBA und beschäftigt sich mit Mensch-Technik-Interaktion und Resilienz von Produktions- und Montagesystemen.

Henrik Siesenis, M.Sc., hat an der Universität Bremen Produktionstechnik studiert und sich in seiner Abschlussarbeit mit dem Einsatz kollaborativer Roboter in der Montage beschäftigt.

Prof. Dr.-Ing. Thies Beinke ist Inhaber des Lehrstuhls für Wirtschaftsingenieurwesen im Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik der Hochschule Fulda sowie Gastwissenschaftler am BIBA.

Prof. Dr.-Ing. Michael Freitag ist Direktor des BIBA sowie Leiter des Fachgebiets Planung und Steuerung produktionstechnischer und logistischer Systeme (PSPS) im Fachbereich Produktionstechnik der Universität Bremen.

Summary

Identification and Evaluation of Application Potenzials for Human-robot Collaboration – Procedure Model for Industrial Assembly. Due to the strong cost pressure as well as the increasing variant diversity, the cooperation between human and robot offers a great potential for the optimization of flexibility and rationalization in assembly. In practice, the targeted identification and evaluation of application potenzials represents the basis for the successful use of collaborative robots. Therefore, this paper proposes and evaluates a procedure model for the methodical analysis of collaborative robots in assembly scenarios.

Bibliography

DOI 10.1515/zwf-2021-0002

ZWF 116 (2021) 1–2; page 8–15

© 2021 Walter de Gruyter GmbH,

Berlin/Boston, Germany

ISSN 0947-0085 · e-ISSN 2511-0896